

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIA KELLY PORTO DA SILVA

**PADRÕES ESPACIAIS DE VARIAÇÃO DA ESTRUTURA FUNCIONAL DA MACROFAUNA
DE PLANÍCIES DE MARÉ SUBTROPICAIS.**

PONTAL DO PARANÁ

2015

PADRÕES ESPACIAIS DE VARIAÇÃO DA ESTRUTURA FUNCIONAL DA MACROFAUNA DE PLANÍCIES DE MARÉ SUBTROPICAIS.

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Oceanografia, habilitação em Pesquisa Oceanográfica, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Paulo da Cunha Lana

Co-orientador: MSc. João Bosco Leite Gusmão Junior

PONTAL DO PARANÁ

2015

Sumário

RESUMO.....	4
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. MÉTODOS	7
2.1 Área de estudo.....	7
2.2 Amostragem e procedimentos laboratoriais.....	8
2.2 Análise dos dados	10
3. RESULTADOS.....	12
3.1 Variáveis ambientais	12
3.2 Riqueza Taxonômica e Diversidade Funcional.....	14
3.3 Análise de Traços Biológicos	16
4. DISCUSSÃO.....	18
REFERÊNCIAS	20

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar os padrões espaciais de variação da estrutura funcional do macrobentos em planícies maré do eixo norte-sul do complexo estuarino de Paranaguá, Paraná, Brasil. Um delineamento amostral espacialmente hierarquizado foi empregado para acessar os padrões de variabilidade em diferentes escalas espaciais, abrangendo de quilômetros a metros. A hipótese que a estrutura funcional das assembleias macrobênticas apresentaria padrões de distribuição espacial semelhantes às características biogeoquímicas dos sedimentos foi parcialmente refutada. Nossos resultados sugerem que a composição funcional das comunidades macrobênticas é determinada em maior parte pelos gradientes entre setores nas maiores escalas espaciais, enquanto as propriedades granulométricas, como tamanho médio do grão, exercem uma maior influência sobre a diversidade funcional, que apenas variou significativamente na escala local.

Palavras-chave:

Macrobentos, diversidade funcional, análise de traços biológicos (BTA), RAO's index.

PADRÕES ESPACIAIS DE VARIAÇÃO DA ESTRUTURA FUNCIONAL DA MACROFAUNA DE PLANÍCIES DE MARÉ SUBTROPICAIS

De acordo com as normas regimentais do curso de Oceanografia da Universidade Federal do Paraná, esta monografia é apresentada na forma de artigo.

Revista pretendida: Hydrobiologia

Julia K. Porto^{1*}, João B. L. Gusmao-Junior¹², Paulo C. Lana¹

¹Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná. Av. Beira-Mar, s/n, Pontal do Sul, CEP 83255-976, PO Box 61, Pontal do Paraná, Paraná, Brasil.

²Department of Marine Benthic Ecology and Evolution (MarBEE), Groningen Institute for Evolutionary Life Sciences (GELIFES), University of Groningen, 9700 CC, Groningen, The Netherlands.

* Corresponding author: juliaporto@ufpr.br;

phone: +554199377486

1. INTRODUÇÃO

Organismos macrobênticos de fundos marinhos não consolidados desempenham papéis funcionais críticos para os ecossistemas costeiros marinhos. A macrofauna é importante produtor secundário, servindo como recurso alimentar direto tanto para populações humanas (e.g. bivalves) quanto para espécies de interesse comercial (e.g. Carlson et al. 1997). Algumas funções estão relacionadas com os hábitos alimentares da macrofauna. Por exemplo, comedores de depósito bioturbam e retrabalham os sedimentos, resultando em um aumento da oxigenação, movimento vertical das partículas e alteração da estabilidade sedimentar (Mermillod-Blondin & Rosenberg 2006, Kristensen et al. 2012, Birchenough et al. 2012). Devido aos efeitos biogeoquímicos da bioturbação, a macrofauna também pode afetar a ciclagem de nitrogênio, carbono e enxofre nos sedimentos marinhos (Snelgrove 1998, Mermillod-Blondin 2011). Assim, estudos que incorporam a análise de aspectos funcionais do macrobentos são especialmente informativos para se compreender a ecologia de sistemas sedimentares marinhos.

Uma variedade de técnicas foi proposta nas últimas duas décadas para analisar diferentes aspectos da estrutura funcional de sistemas ecológicos. A grande maioria destas técnicas enfoca um ou mais traços funcionais apresentados pelas espécies. Um traço funcional é qualquer características mensurável no nível de indivíduo relacionada com a performance do organismo e com algum processo ou propriedade do ecossistema (Violle et al. 2007, Mlambo 2014). As duas técnicas que enfocam traços funcionais mais amplamente utilizadas são a análise de traços biológicos (Biological Traits Analysis, BTA; Bremner et al. 2006) e a quantificação de índices de diversidade funcional (Villéger et al. 2008, Laliberté & Legendre 2010). A BTA é um método para a análise das tendências de variação das frequências dos traços funcionais das assembleias ao longo de gradientes espaciais ou temporais. BTAs são geralmente construídas a partir de ordenações multivariadas, tais como análise de correspondência (CA) e análise de componentes principais (PCA). Por outro lado, índices de diversidade funcional quantificam a variedade de traços funcionais em uma assembleia, podendo ou não ponderar as abundâncias das espécies. O índice multivariado da Entropia Quadrática de Rao (Rao's Quadratic Entropy, RaoQ) representa o índice mais amplamente utilizado e possivelmente um dos mais robustos para quantificação da diversidade funcional (Schleuter et al. 2010). RaoQ representa uma forma generalizada do índice clássico de diversidade de Simpson e se baseia na abundância específica e nas diferenças funcionais entre pares de espécies em uma assembleia (Botta-Dukát 2005). O uso combinado da BTA e RaoQ tem se mostrado uma abordagem informativa para se analisar estrutura funcional de assembleias bênticas (Gusmao et al. 2016).

Apesar do interesse recente em técnicas para análise da estrutura funcional de assembleias, a grande maioria dos estudos utilizando tais técnicas em ambientes bênticos marinhos enfoca sistemas temperados (e.g. Darr et al. 2014, Bolam & Eggleton 2014). Trabalhos que utilizam tal abordagem em sistemas bênticos tropicais ou

subtropicais ainda são raros (e.g. Gusmao et al. 2016, Otegui et al. 2016), especialmente para a costa sul americana. Dentre as poucas publicações mais recentes do território sul americano, podemos citar Pacheco et al. (2011), que analisaram mudanças na composição funcional macrobêntica ao longo de um gradiente de profundidade no Chile; Gusmao et al. (2016), que analisaram a variação da estrutura funcional macrobêntica ao longo de um gradiente de poluição no Paraná; e Otegui et al. (2016), que descreveram a relação entre morfologia e função ao longo de gradientes sedimentares. A análise da estrutura funcional aplicada em distintas escalas espaciais em sistemas tropicais ou subtropicais produziria novas informações acerca da relação entre propriedades sedimentares e a estrutura das assembleias bênticas.

Este estudo teve como objetivo analisar os padrões espaciais de variação da estrutura funcional do macrobentos em planícies maré do eixo norte-sul do complexo estuarino de Paranaguá, Paraná, Brasil. Considerando que a composição específica do macrobentos é determinada em grande parte pelas características biogeoquímicas dos sedimentos, espera-se que a estrutura funcional dessas assembleias, definida pela composição e diversidade de traços funcionais, apresentará padrões de distribuição espacial coincidentes com a variabilidade do substrato. Um delineamento amostral espacialmente hierarquizado foi empregado para avaliar os padrões de variabilidade em diferentes escalas espaciais, abrangendo de quilômetros a metros. A estrutura funcional do macrobentos foi analisada através de BTAs (para composição funcional) e do índice RaoQ (para diversidade funcional).

2. MÉTODOS

2.1 Área de estudo

As amostragens foram realizadas entre os dias 11 e 14 de junho de 2014 em planícies de maré distribuídas ao longo do eixo norte-sul da Baía de Paranaguá, Estado do Paraná, no sul do Brasil (Fig. 1). As marés locais apresentam amplitude máxima de 2 m, a profundidade média é de 5,4 m, o volume total em torno de 14109 m³ e o tempo de residência é de aproximadamente 3,49 dias (Lana et al. 2001). A dinâmica dos sistemas sedimentares é altamente influenciada pelas correntes de maré.

Quatro setores de amostragem foram definidos em extensas planícies de maré do complexo estuarino de Paranaguá (Figura 3): dois na Baía das Laranjeiras (Mariana, 25°23'26"S 48°24'48"O e Guapicu, 25°23'20"S 48°20'00"O); um na região central do CEP, no Baixio do Perigo (Perigo 25°28,35'S 48°25,92'O); e um no Saco do Limoeiro, na Ilha do Mel (Limoeiro, 25°33,61'S 48°18,96'O). As planícies de maré do setor Baixio do Perigo, localizado na região central do CEP, é formado basicamente por areia fina bem selecionada com baixo teor de matéria orgânica (Noernberg et al. 2006). Caracteriza-se por fraca declividade e pela presença de estruturas

carbonáticas como conchas do bivalve *Anomalocardia brasiliiana* e restos do equinodermo *Encope marginata*. O setor do Limoeiro localiza-se na porção sul da Ilha do Mel, próximo à desembocadura da baía. Apresenta fraca declividade e seus sedimentos variam de bem selecionados a pobremente selecionados, com dominância de areia fina e muito fina (Couto et al. 1995, Couto & Savian 1998). A estrutura do macrobentos é primariamente condicionada pelas espécies dominantes, como o tanaidáceo *Monokalliapseudes schubarti*, pela presença de densas manchas da rodófito *Acanthophora spicifera*, da angiosperma *Halodule wrightii* e de valvas vazias de *Anomalocardia brasiliiana* (Couto et al. 1995, Couto & Savian 1998). Os setores do Guapicu e Mariana estão localizados na porção intermediária da Baía das Laranjeiras. Estas planícies de maré apresentam fraca declividade (máxima de 1,3%) e os sedimentos são dominados pela fração de areia fina com grau de seleção que varia entre bem selecionado a moderadamente selecionado (Krug & Noernberg 2007).

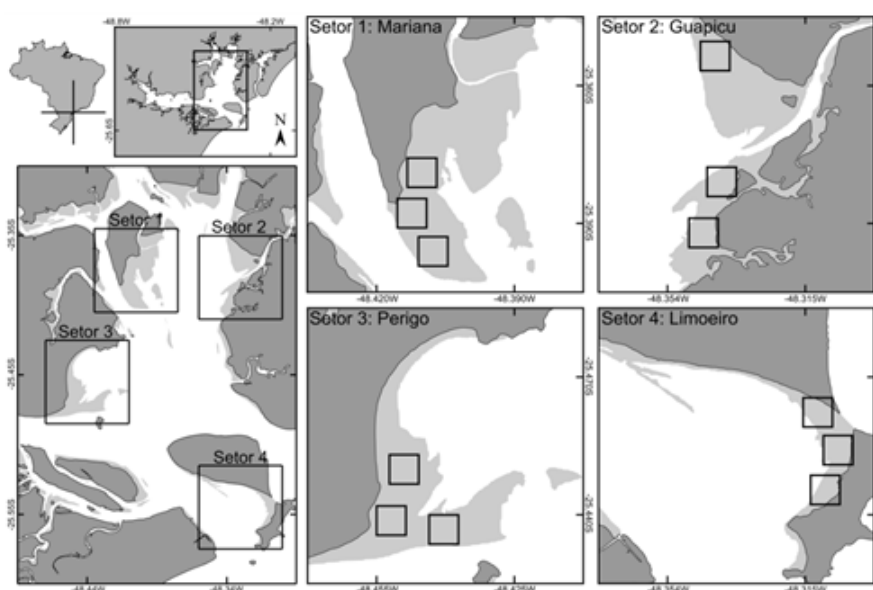


Figura 1: Mapa destacando as áreas de estudo na Baía de Paranaguá. Setores (quadrados maiores) e áreas (quadrados menores dentro dos setores) de amostragem em destaque. Planícies de maré destacadas em cinza claro.

2.2 Amostragem e procedimentos laboratoriais

Para análise dos padrões de variabilidade da riqueza de espécies e da diversidade funcional das assembleias macrobênticas, foi adotado um delineamento amostral hierarquizado, cujas escalas espaciais incluem Setores (quilômetros), Áreas (centenas de metros), Locais (dezenas de metros), Sítios (metros) e *quadrats* ou réplicas (decímetros), como esquematizado na a figura 2. Em cada um dos setores, que distam entre si na escala dos quilômetros, três áreas de aproximadamente 500 m x 500 m, distanciadas pelo menos 200 m entre si, foram estabelecidas. Dentro de cada área, três locais de 50 m x 50 m foram delimitados, nos quais dois sítios de

amostragem de 2 m x 2 m foram estabelecidos. Em cada sítio, dois *quadrats* de 0,5 m x 0,5 m foram aleatoriamente distribuídos. A amostragem do macrobentos foi feita com corers de 15 cm de diâmetro por 10 cm de altura, no centro de cada *quadrat*, somando um total de 156 *quadrats* (réplicas amostrais). Também foram coletadas amostras de sedimento para determinação de propriedades texturais e de massa do substrato (tamanho do grão e grau de seleção) e para a análise da concentração de nutrientes (P, N e C total).

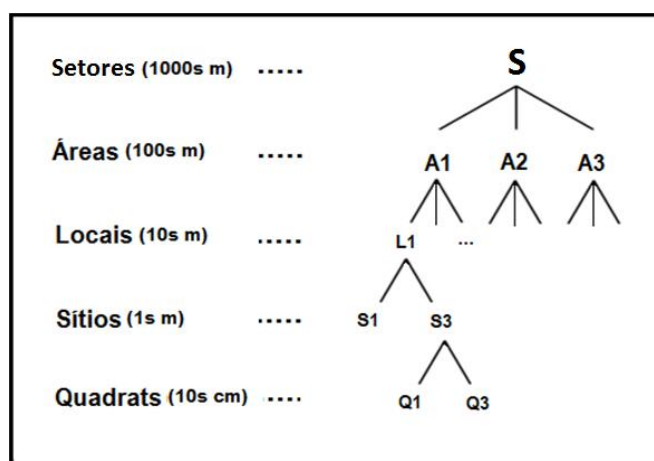


Figura 2: Diagrama do delineamento amostral hierarquizado com cada nível e respectiva escala de abrangência e configuração esquemática dos sítios de amostragem.

As amostras do macrobentos foram fixadas com soluções de formol a 7% e posteriormente lavadas em peneiras de 0,5 mm para separação do macrobentos. Resíduos das lavagens retidos nas peneiras foram conservados em solução de álcool 70% e corados com Rosa de Bengala. A triagem e identificação dos organismos foram feitas em estereomicroscópio até a máxima resolução taxonômica possível.

A textura do sedimento foi avaliada por um granulômetro a laser Microtrac Bluewave® que utiliza tecnologia de refração de luz. O teor de matéria orgânica foi determinado pela medida da diferença entre os pesos inicial e final após queima de 5 g de sedimento em uma mufla a 550° C durante 60 minutos. O teor de carbonato de cálcio foi estimado pela medida da diferença de pesos inicial e final após acidificação de 10 g de sedimento em 20 ml de HCl a 10%. Concentrações de N e P foram medidas seguindo o método de (Grasshoff et al. 1983), e as concentrações de C foram medidas através do método de oxidação de (Strickland & Parsons 1972).

2.2 Análise dos dados

Uma análise de componentes principais (Principal Components Analysis, PCA) foi feita para visualizar os padrões espaciais de variação das variáveis biogeoquímicas dos sedimentos, incluindo tamanho do grão (μm), grau de seleção do sedimento (μm), carbono orgânico total (mg C/g), nitrogênio total (mg N/g), fósforo total (mg P/g), teor de matéria orgânica (%) e fragmentos de conchas (mg). Estas análises não foram replicadas para todos os *quadrats*, mas realizadas para cada sítio de amostragem (n= 78).

Para determinar a estrutura funcional das assembleias macrobênticas, quatro traços funcionais foram considerados: tipo de bioturbação, mobilidade, alimentação e tamanho corporal dos adultos. Estes traços foram selecionados por estarem relacionados com a história de vida, morfologia, adaptações ecológicas e comportamento das espécies. Os animais foram classificados conforme o grau de associação com as diferentes categorias de cada traço (Tabela 1). A classificação foi feita com base nas informações coletadas da literatura regional e internacional (Arruda et al. 2003, Rios 2009, Pagliosa et al. 2012, Jumars et al. 2015) (i.e., Arruda et al. 2003, Pagliosa et al. 2012, Jumars et al. 2015), bancos de dados online como BIOTIC (<http://www.marlin.ac.uk/biotic/>)m, kkkkkkkkkkm,, The Polychaetes Scratchpad (<http://polychaetes.lifewatchgreece.eu/>) e Marine Macrofauna Genus Trait Handbook (<http://www.genustraithandbook.org.uk/>), além da opinião de especialistas. Táxons raros (menos que 10 indivíduos no total) não foram incluídos nas análises da estrutura funcional. Táxons individuais foram classificados em categorias de cada traço utilizando codificação *fuzzy* (Chevenet et al. 1994), a qual associa escores que variam de 0 a 3 para cada categoria do traço, sendo que 0 representa ‘sem afinidade’ e 3 ‘total afinidade’.

Tabela 1. Traços biológicos e categorias usados para descrever a diversidade funcional da comunidade macrobêntica.

Traços biológicos	no.	Categorias
Tamanho do corpo	1	≤ 5 mm
	2	5-10 mm
	3	10-20 mm
	4	20-40 mm
	5	40-80 mm
	6	80-160 mm

Bioturbação	1	Nenhum
	2	Biodifusor
	3	Difusor de galeria
	4	Transportador para cima
	5	Transportador para baixo
	6	Bioirrigador
Mobilidade relativa	1	Nenhum
	2	Baixo
	3	Medio
	4	Alto
Modo de alimentação	1	Depositívoro
	2	Suspensívoro
	3	Oportunista/saprófago
	4	Herbívoro
	5	Carnívoro/Predador

A diversidade funcional foi computada pelo cálculo do índice multivariado Rao's Q ou Entropia Quadrática de Rao (Botta-Dukát 2005). Este índice calcula as diferenças funcionais entre pares de espécies ponderando as respectivas abundâncias, tomando como base uma matriz de associação (distância euclidiana) construída a partir dos valores da codificação *fuzzy* de cada categoria dos traços. Elevados valores do índice Q de Rao são esperados quando as espécies são funcionalmente distintas umas das outras e quando as abundâncias não estão concentradas em grupos de táxons com traços funcionais similares (Morais et. al, *in progress*). Este índice foi calculado para todas as 156 amostras.

A variabilidade da riqueza taxonômica e da diversidade funcional foi analisada por ANOVA utilizando um modelo linear misto. Os fatores considerados foram: setor (fixo, quatro níveis: Mariana, Guapicu, Perigo e Limoeiro), área (aleatório, quatro níveis, aninhado em setor), local (aleatório, três níveis, aninhado em área) e sítio (aleatório, dois níveis, aninhado em local). Adicionalmente, foi calculado o componente de variância (VC%) para estimar a contribuição de cada fonte de variabilidade espacial para a variação total pelo método de Máxima

Verossimilhança dos Resíduos (Residual Maximum Likelihood method, REML). A homogeneidade das variâncias foi analisada utilizando o teste de Cochran ($\alpha = 0,05$).

Uma análise de traços biológicos (Biological Traits Analysis, BTA) baseada em análise de correspondência canônica (CCA) foi utilizada para avaliar as mudanças espaciais na composição funcional das assembleias macrofaunais. A matriz funcional com os escores das categorias dos traços funcionais para cada táxons foi multiplicada pela matriz de abundância (transformada para a raiz quadrada), gerando uma terceira matriz com a abundância de cada categoria de traço para cada uma das amostras. Esta matriz foi utilizada nas análises que compuseram a BTA. A seleção de variáveis ambientais para a CCA foi baseada em análise de colinearidade e regressão *step-wise*.

Todas as análises foram feitas no programa computacional R (R Development Core Team 2009) utilizando o pacote 'vegan' para as análises PCA e CCA (Oksanen et al. 2009), 'FD' para calcular o índice RaoQ e 'GAD' para as Anovas e teste de Cochran (Sandrini-Neto & Camargo 2010).

3. RESULTADOS

3.1 Variáveis ambientais

Tendências de variação das propriedades biogeoquímicas dos sedimentos estão representadas na PCA (Fig. 3). O eixo 1 explicou 29.1% da variabilidade total e estava relacionado com o teor de matéria orgânica, carbonatos (CaCO_3) e concentrações de P e N. Diferenças entre o Baixio do Perigo (setor 3, branco) e os demais setores estavam relacionadas a este eixo. O eixo 2 explicou 19,6% da variabilidade total e estava relacionado com variações no grau de seleção, tamanho médio do grão, teor de matéria orgânica e concentração de C. Os setores do Guapicu (setor 2, preto) e o Baixio do Perigo (setor 3, branco) apresentaram maior variabilidade interna (entre áreas e locais) do que os demais. A variabilidade interna no Guapicu estava principalmente associada ao eixo 2, enquanto que o Baixio do Perigo estava com os dois primeiros eixos. Valores médios de cada variável ambiental para cada setor são mostrados na tabela 2.

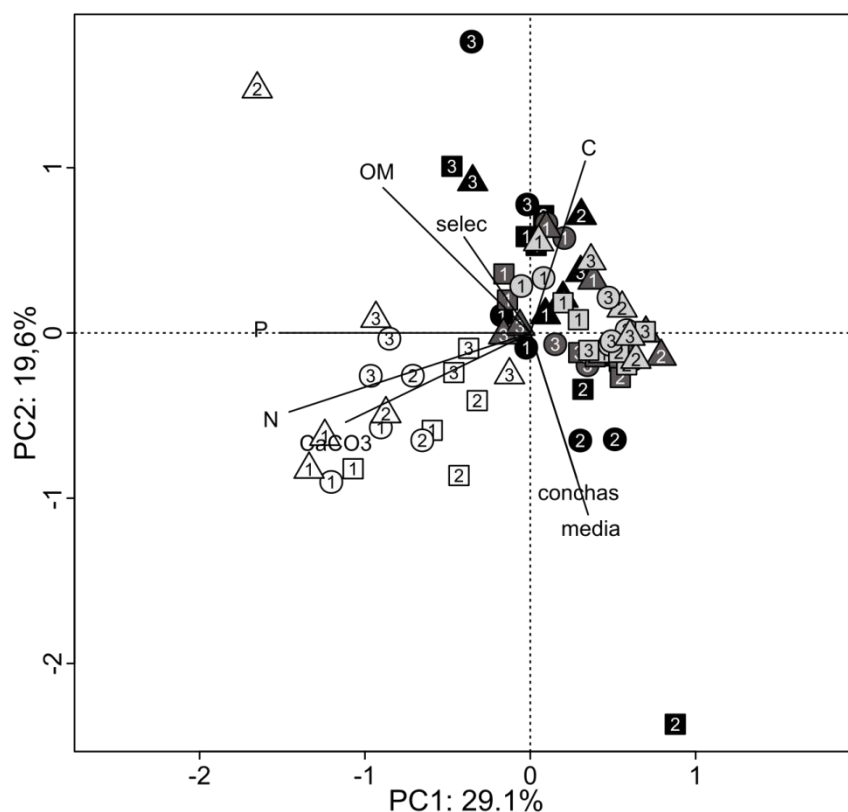


Fig. 3. Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis ambientais. Cinza claro = Setor 1 (Mariana); preto = Setor 2 (Guapicu), branco= Setor 3 (Baixio do Perigo) e cinza escuro = Setor 4 (Saco do Limoeiro); Áreas estão representadas por números; Círculo = local 1; quadrado = local 2; triângulo = local 3; C = carbono orgânico total; N = nitrogênio; P = fósforo; CaCO₃ = carbonato de cálcio; MO = matéria orgânica; Selec = grau de seleção; Media = tamanho do grão (mz); Conchas = fragmentos de conchas.

Tabela 2: Valores médios (\pm DP) das variáveis geoquímicas do sedimento nos quatro setores amostrados.

Variables	Mariana (1)	Guapicu (2)	Perigo (3)	Limoeiro (4)
Conchas (mg)	80,37 \pm 33,48	13,06 \pm 30,22	135,51 \pm 75,56	96,78 \pm 64,09
Fósforo (mg P/g)	2,72E-3 \pm 0,5	3,14E-3 \pm 1,1	4,78E-3 \pm 0,9	2,69E-3 \pm 0,6
Nitrogênio (mg N/g)	5,56E-2 \pm 1,7	2,07E-1 \pm 0,7	4,72E-1 \pm 1,3	4,47E-2 \pm 2,6
Carbono (mg C/g)	5,83 \pm 0,93	7,74 \pm 4,48	3,79 \pm 2,56	8,40 \pm 1,84
Matéria Orgânica (%)	1,56 \pm 0,91	1,94 \pm 0,77	2,03 \pm 1,30	1,89 \pm 0,76
Carbonato de Cálcio (%)	2,64 \pm 1,57	2,13 \pm 0,81	7,72 \pm 3,11	5,77 \pm 2,52
Tamanho do grão (μ m)	178,69 \pm 15,17	194,57 \pm 35,93	184,13 \pm 24,13	191,78 \pm 13,30

Grau de seleção	56,29 ± 6,45	75,95 ± 9,67	64,39 ± 9,92	56,34 ± 5,85
-----------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Diferenças significativas entre setores foram constatadas para as variáveis N, CaCO₃ e grau de seleção (Tabela 3 e 4). Estas variáveis também apresentaram maior componente de variância associado com a escala de Setor (Tabela 4). Diferenças significativas entre áreas foram observadas para todas as variáveis ambientais (Tabela 3). Apenas a variável carbono total (C) apresentou maior componente de variância na escala de Área. Diferenças significativas entre locais foram observadas para as variáveis conchas, CaCO₃ e tamanho médio do grão. O tamanho médio do grão apresentou maior componente de variância na escala de Local (38.92). Apenas fósforo total (P) apresentou maior componente de variância na escala de Sítio (respectivamente, 78,88 e 52,16, Tabela 4).

Tabela 3: Resultado (p-valor) das ANOVAs das variáveis ambientais. gl = grau de liberdade; conchas = peso das conchas; N = nitrogênio; P = fósforo; C = Carbono; CaCO₃ = Carbonato de cálcio; MO = matéria orgânica; média = tamanho do grão; selec = grau de seleção.

	gl	conchas	N	P	C	CaCO ₃	MO	media	selec
Setor	3	0.07	0.0001	0.05	0.2	0.005	0.8	0.7	0.009
Area	8	0.001	3.4E-05	0.03	2.4E-06	0.04	0.003	0.03	0.005
Local	24	0.004	0.5	0.9	0.3	0.04	0.5	2.2E-05	0.4
Residuo	36								

Tabela 4: Componente de variância (VC%) de cada termo das ANOVAs das variáveis ambientais. Df = Grau de liberdade; conchas; N = nitrogênio; P = fósforo; C = Carbono; CaCO₃ = Carbonato de cálcio; MO = matéria orgânica; media = tamanho do grão; selec = grau de seleção.

	gl	conchas	N	P	C	CaCO ₃	MO	media	selec
Setor	3	30	62.4	26.6	23.3	39.2	0	0	39.7
Area	8	28.9	19.3	21.3	39.7	18.0	42.3	32.5	22.7
Local	24	19.7	0	0	8.3	17.3	0	38.6	5.9
Residuo	36	21.5	18.3	52.2	28.6	25.6	57.7	28.9	31.8

3.2 Riqueza Taxonômica e Diversidade Funcional

A diversidade funcional e a riqueza de espécies apresentaram padrões distintos de variabilidade espacial (Figura 4, Tabela 5). Diferenças significativas entre valores médios da diversidade funcional foram observados apenas entre locais. A diversidade funcional apresentou maior componente de variância na escala residual ou dos quadrats (33,29%) e de locais (31%). A riqueza de espécies variou significativamente entre áreas e locais. Os maiores valores do componente de variância foram observados na escala residual (36,29%) e área (23,43%).

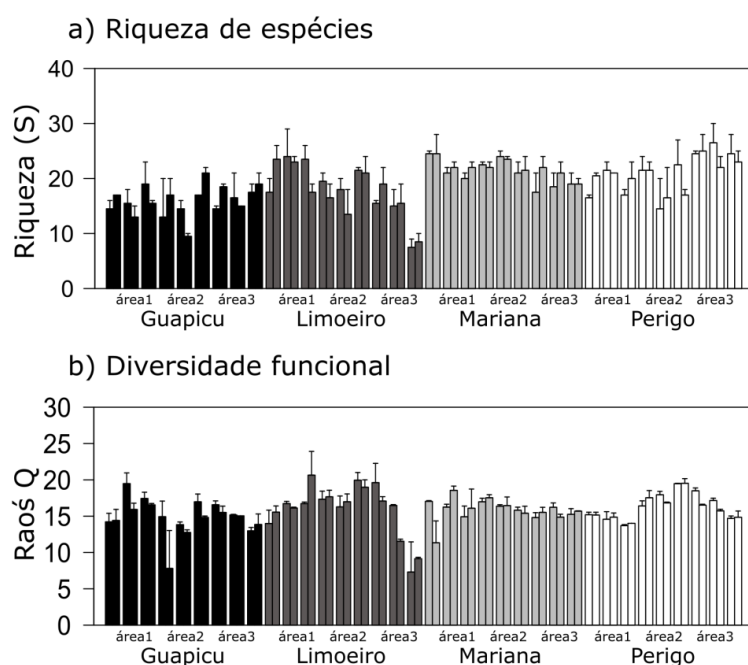


Figura 4: Valores médios (\pm SE) de diversidade funcional e riqueza de espécies do macrobentos. Setores (G – Guapicu; L – Limoeiro; M – Mariana; P – Perigo), áreas (A1, A2 e A3), locais (L1, L2 e L3) e Sítios (1 e 2).

Tabela 5: Resumo das Anovas realizadas para riqueza de espécies e diversidade funcional do macrobentos. Foram considerados os fatores espaciais (Setor, Área, Local, Sítio). gl = grau de liberdade; MS = quadrado médio; F = f-valor; P = p-valor; e VC% = componente de variância.

	Diversidade funcional					Riqueza de espécies			
Escalas	gl	mq	F	p	VC(%)	mq	F	p	VC(%)
Setor		12.6	0.4	0.7	0	239.6	2.8	0.1	21.4
Área	8	30.3	1.8	0.1	19.6	84.8	3.7	0.006	23.4
Local	24	16.5	3.4	0.001	31.0	22.7	2.5	0.007	18.9

Sítio	36	4.9	1.5	0.1	16.1	9.2	0.7	0.8	0
Residual	72	3.3			33.3	12.4			36.3
Cochran's test					0.001				0.3

3.3 Análise de Traços Biológicos

Resultados da BTA podem ser visualizados nas ordenações CCA da figura 5. O primeiro eixo explicou 76,9% da variabilidade total e estava associado com diferenças entre o Saco do Limoeiro (cinza escuro) e os demais setores (Figura 5a). Variações nos teores de P e N e no grau de seleção do sedimento estavam associadas com o primeiro eixo. O segundo eixo explicou 11,3% da variabilidade total e estava associado com diferenças entre Mariana (cinza claro) e Saco do Limoeiro, e com a variabilidade interna dos setores Guapicu (Preto) e Baixo do Perigo (branco). Vetores de cada categoria de traço funcional são mostrados nas figuras 5c-5f. Saco do limoeiro foi caracterizado por apresentar organismos depositívoros, difusores de galeria e bio-irrigadores, baixa mobilidade e tamanho entre 20 a 160. Mariana apresentou predominância de Herbívoros, com baixa ou moderada mobilidade, transportadores para baixo e tamanho entre 5-10 mm. Guapicu e Saco do Limoeiro foram caracterizados por organismos pequenos (<5 a 10 mm), com limitada poder de bioturbação, alta mobilidade e predominância dos tipos alimentares oportunistas/carnívoros, predadores e suspensívoros.

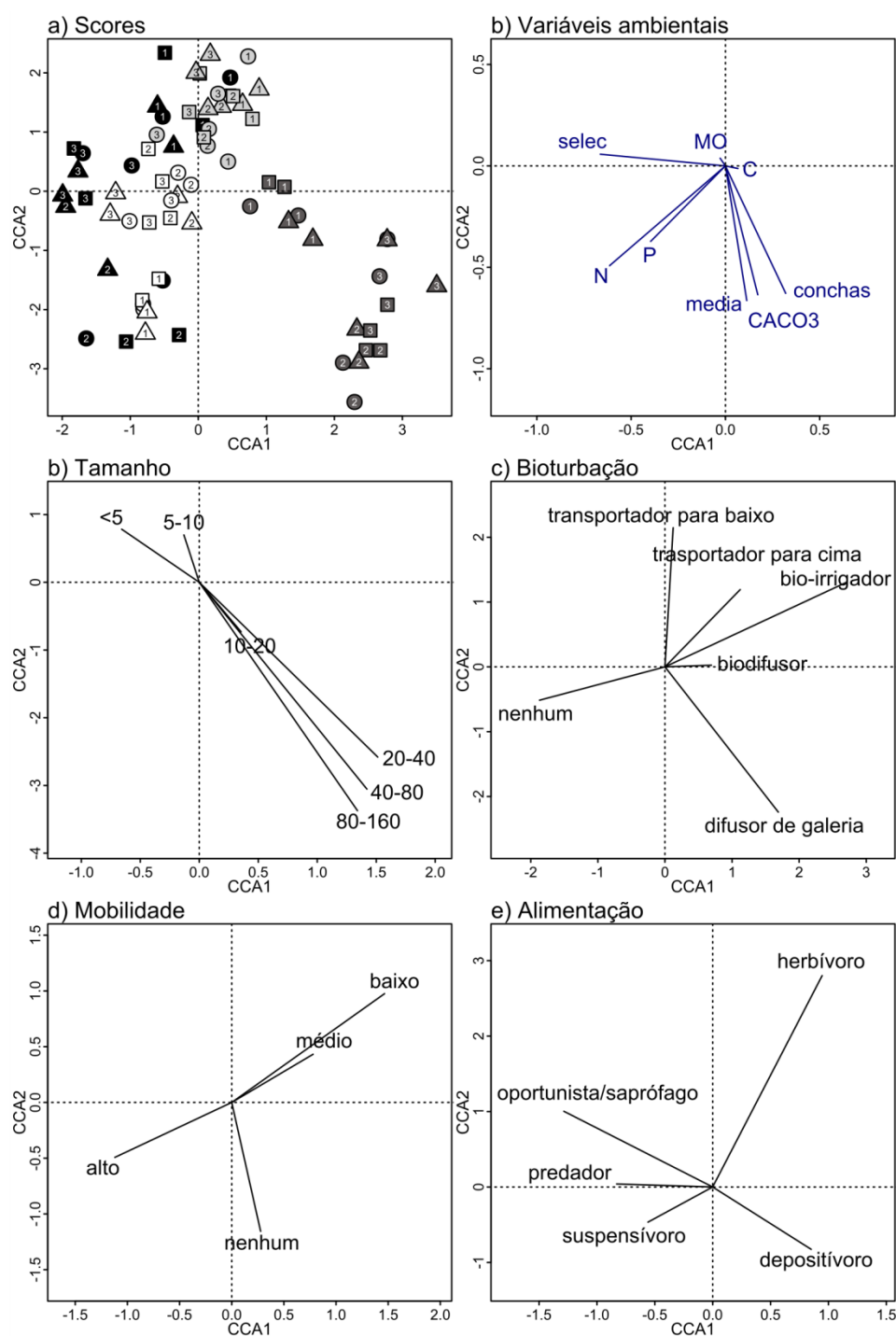


Figura 5: Análise de correspondência canônica (CCA) representando a variabilidade da composição dos traços funcionais em cada setor, área e local. Cinza claro = Setor 1 (Mariana); preto = Setor 2 (Guapicu), branco= Setor 3 (Baixio do Perigo) e cinza escuro = Setor 4 (Saco do Limoeiro); Áreas estão representadas por números; Circulo = local 1; quadrado = local 2; triângulo = local 3.

4. DISCUSSÃO

Os distintos padrões de variabilidade da composição funcional e das características dos sedimentos sugerem uma fraca relação entre a distribuição dos traços funcionais e gradientes das variáveis sedimentológicas. Por outro lado, a diversidade funcional apresentou padrões de variação similares ao do tamanho do grão, evidenciando um efeito desta variável ambiental na estrutura funcional das comunidades estudadas. Estes resultados nos levam a rejeitar parcialmente a previsão de que os padrões de variação espacial da estrutura funcional seguiriam o gradiente ambiental estuarino. A composição e a diversidade funcionais apresentaram padrões distintos de variação ao longo das escalas espaciais, evidenciando a importância de incorporar diferentes formas de abordagem da estrutura funcional do macrobentos de planícies de maré ao longo de distintas escalas espaciais.

A BTA mostrou um gradiente na composição funcional ao longo dos setores, com o setor do Limoeiro se distinguindo dos demais. As variáveis ambientais grau de seleção, concentração de fragmentos de conchas, teor de carbonatos e nitrogênio também apresentaram diferenças significativas entre setores, mas neste caso o setor do Limoeiro não foi o responsável por tais diferenças. Isso sugere que apenas estas variáveis ambientais não explicam o fato do setor do Limoeiro apresentar uma composição funcional distinta dos demais setores. Tais diferenças poderiam estar relacionadas com variações da salinidade ao longo do estuário, visto que é um dos principais determinantes no *turnover* de espécies nestes sistemas costeiros (Reise 1985, Dauer 1993). Os demais setores localizados no interior do complexo estuarino apresentam salinidades que variam aproximadamente entre 3 e 25. Este gradiente de salinidade possivelmente atua como um importante filtro ambiental que limita ou favorece o estabelecimento de espécies com determinados traços. Outros estudos que analisaram a estrutura funcional do bentos demonstraram que o gradiente de salinidade representa um dos principais fatores na estruturação das assembleias macrobênticas (Linden et al. 2012, Törnroos et al. 2014).

A diversidade funcional apresentou maior variabilidade na escala local e não apresentou diferenças significativas entre setores. Tal padrão contrasta com outros estudos que descreveram mudanças na diversidade funcional em distintas localidades ao longo de um gradiente estuarino (Törnroos et al. 2014). A maior variabilidade escala local da diversidade funcional poderia estar associada a variações de curto-prazo nas condições abióticas (Morais et al. *in progress*), apesar da falta de replicação temporal impedir maiores inferências a respeito. A riqueza de espécies também não apresentou diferenças significativas entre setores, sendo mais variável nas escalas de área e local. O fato do índice de diversidade funcional de Rao ser independente da riqueza de espécies (Botta-Dukát 2005) descarta a possibilidade de que a maior variabilidade na escala local seja apenas um mero reflexo dos padrões da riqueza de espécies. O tamanho do grão foi a variável ambiental que apresentou maior variabilidade na escala local. Essa variável é descrita como um dos principais fatores que determinam os

padrões de distribuição do macrobentos (Reise 2002, Anderson 2008, Paganelli et al. 2012). Por exemplo, espécies macrobênticas que apresentam distintos modos de alimentação podem coexistir em diferentes proporções, dependendo das características sedimentares (Reise 1985). Além disso, a concentração de fragmentos de conchas também apresentou maior variabilidade na escala local. Este fator contribui para a heterogeneidade do substrato, servindo como fonte de recursos e abrigo para diversas espécies. Assim, os padrões observados de diversidade funcional do macrobentos podem estar associados à heterogeneidade do substrato e das características granulométricas.

Apesar do presente estudo ter abrangido uma grande área do CEP, que incluiu as quatro maiores planícies de maré do eixo norte-sul, a falta de replicação temporal nos impede de desenvolver maiores generalizações para explicar os padrões encontrados. Sabe-se que a ocorrência de espécies macrobênticas é influenciada por variações temporais de curto e longo prazo que podem causar mudanças na composição taxonômica e possivelmente na diversidade funcional. Exemplos de fatores que podem promover tais variações temporais são perturbações locais (Diaz & Rosenberg 2008) e padrões sazonais de recrutamento (Arntz & Rumohr 1982). A análise de apenas um sistema estuarino também representou uma limitação para as nossas generalizações, visto que cada estuário possui características geomorfológicas distintas. Assim, reconhecemos que um delineamento temporalmente replicado que incorpore mais de um estuário nos daria maior poder para descrever padrões gerais de variação da estrutura funcional bênticas em planícies de maré.

Este trabalho analisou os padrões espaciais de variação da diversidade funcional através da utilização de um delineamento amostral espacialmente hierarquizado ao longo do eixo norte-sul do Complexo Estuarino de Paranaguá. A análise da variabilidade da diversidade e composição funcional bem como das características do substrato nos permitiu inferir sobre os fatores que moldam a estrutura funcional bêntica destes sistemas sedimentares, dando ainda insights sobre a possível variabilidade dos processos sedimentares mediados pelos organismos ao longo dos setores analisados. No geral, observamos que gradientes entre setores possivelmente são os determinantes da composição funcional na grande escala, enquanto que propriedades granulométricas como tamanho médio do grão aparentemente são mais influentes na diversidade funcional, que apenas variou significativamente na escala local. As diferenças nos padrões encontrados para composição e diversidade funcional evidenciam a necessidade de incorporar os dois tipos de análise, BTA e métricas de diversidade funcional, para descrever em detalhes os padrões espaciais de variabilidade da estrutura funcional do macrobentos.

REFERÊNCIAS

- Anderson MJ (2008) Animal-sediment relationships re-visited: characterising species' distributions along an environmental gradient using canonical analysis and quantile regression splines. *J Exp Mar Bio Ecol* 366:16–27
- Arntz WE, Rumohr H (1982) An experimental study of macrobenthic colonization and succession, and the importance of seasonal variation in temperate latitudes. *J Exp Mar Bio Ecol* 64:17–45
- Arruda EP, Domaneschi O, Amaral ACZ (2003) Mollusc feeding guilds on sandy beaches in São Paulo State, Brazil. *Mar Biol* 143:691–701
- Birchenough SNR, Parker RE, McManus E, Barry J (2012) Combining bioturbation and redox metrics: Potential tools for assessing seabed function. *Ecol Indic* 12:8–16
- Bolam SG, Eggleton JD (2014) Macrofaunal production and biological traits: spatial relationships along the UK continental shelf. *J Sea Res* 88:47–58
- Botta-Dukát Z (2005) Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. *J Veg Sci* 16:533–540
- Bremner J, Rogers SI, Frid CLJ (2003) Assessing functional diversity in marine benthic ecosystems: a comparison of approaches. *Mar Ecol Prog Ser* 254:11–25
- Bremner J, Rogers SI, Frid CLJ (2006) Matching biological traits to environmental conditions in marine benthic ecosystems. *J Mar Syst* 60:302–316
- Carlson JK, Randall TA, Mroczka ME (1997) Feeding habits of winter flounder (*Pleuronectes americanus*) in a habitat exposed to anthropogenic disturbance. *J Northwest Atl Fish Sci* 21:65–73
- Chevenet F, Dolédec S, Chessel D (1994) A fuzzy coding approach for the analysis of long-term ecological data. *Freshw Biol* 31:295–309
- Couto ECG, Almeida MVO, Lana PC (1995) Diversidade e distribuição da macroinfauna bêmica do Saco do Limoeiro - Ilha do Mel, Paraná - outono de 1990. *Publicação Espec do Inst Ocean* 11:239–247
- Couto ECG, Savian M (1998) Caracterização sedimentológica da planície intertidal da parte sul do Saco do Limoeiro (Ilha do Mel - Paraná - Brasil). I. Implicações Ecológicas. *Arq Biol e Tecnol* 41:237–246
- Darr A, Gogina M, Zettler ML (2014) Functional changes in benthic communities along a salinity gradient - a

western Baltic case study. *J Sea Res* 85:315–324

Dauer DM (1993) Biological criteria, environmental health and estuarine macrobenthic community structure. *Mar Pollut Bull* 26:249–257

Diaz RJ, Rosenberg R (2008) Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* (80-) 321:926–929

Grasshoff K, Ehrhardt M, Kremling K (1983) *Methods of Seawater Analysis*, Second edi. Verlag Chemie, Weinheim, Germany

Gusmao JB, Brauko KM, Eriksson BK, Lana PC (2016) Functional diversity of macrobenthic assemblages decreases in response to sewage discharges. *Ecol Indic* 66:65–75

Jumars P a, Dorgan KM, Lindsay SM (2015) Diet of worms emended: an update of polychaete feeding guilds. *Ann Rev Mar Sci* 7:497–520

Kristensen E, Penha-lobes G, Delefosse M, Valdemarsen T, Quintana CO, Banta GT (2012) What is bioturbation? The need for a precise definition for fauna in aquatic sciences. *Mar Ecol Prog Ser* 446:285–302

Krug LA, Noernberg MA (2007) Sensoriamento remoto como ferramenta para determinação de batimetria de baixios na baía das laranjeiras, Paranaguá - PR. *Rev Bras Geofísica* 25:101–105

Laliberté E, Legendre P (2010) A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology* 91:299–305

Lana PC, Marone E, Lopes RM, Machado EC (2001) The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: Seeliger U, Kjerfve B (eds) *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. Springer-Verlag, Berlin, p 131–145

Linden P Van Der, Patrício J, Marchini A, Cid N, Magalhães J, Carlos J (2012) A biological trait approach to assess the functional composition of subtidal benthic communities in an estuarine ecosystem. *Ecol Indic* 20:121–133

Mermillod-Blondin F (2011) The functional significance of bioturbation and biodeposition on biogeochemical processes at the water-sediment interface in freshwater and marine ecosystems. *J North Am Benthol Soc* 30:770–778

Mermillod-blondin F, Rosenberg R (2006) Ecosystem engineering: the impact of bioturbation on biogeochemical processes in marine and freshwater benthic habitats. *Aquat Sci* 68:434–442

- Mlambo MC (2014) Not all traits are “functional”: insights from taxonomy and biodiversity-ecosystem functioning research. *Biodivers Conserv* 23:781–790
- Noernberg MA, Lautert LFC, Araújo AD, Marone E, Angelotti R, Netto Jr JPB, Krug LA (2006) Remote sensing and GIS integration for modelling the Paranaguá estuarine complex - Brazil. *J Coast Res* SI:1627–1631
- Oksanen J, Kindt R, Legendre P, O’Hara B, Simpson GL, Solymos P, Henry M, Stevens H, Wagner H (2009) *vegan: Community Ecology Package*.
- Otegui MBP, Brauko KM, Pagliosa PR (2016) Matching ecological functioning with polychaete morphology: Consistency patterns along sedimentary habitats. *J Sea Res*
- Pacheco AS, González MT, Bremner J, Oliva M, Heilmayer O, Laudien J, Riascos JM (2011) Functional diversity of marine macrobenthic communities from sublittoral soft-sediment habitats off northern Chile. *Helgol Mar Res* 65:413–424
- Paganelli D, Marchini A, Occhipinti-Ambrogi A (2012) Functional structure of marine benthic assemblages using Biological Traits Analysis (BTA): A study along the Emilia-Romagna coastline (Italy, North-West Adriatic Sea). *Estuar Coast Shelf Sci* 96:245–256
- Pagliosa PR, Cantor M, Scherner F, Otegui MBP, Lemes-Silva AL, Martins CDL, Alves GF, Fonseca A, Horta Jr PA (2012) Influence of piers on functional groups of benthic primary producers and consumers in the channel of a subtropical coastal lagoon. *Brazilian J Oceanogr* 60:65–73
- R Development Core Team (2009) *R: A language and environment for statistical computing*.
- Reise K (1985) *Tidal Flat Ecology*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- Reise K (2002) Sediment mediated species interactions in coastal waters. *J Sea Res* 48:127–141
- Rios E (2009) *Compendium of brazilian sea shells*. Evangraf, Rio Grande, Brazil
- Sandrini-Neto L, Camargo MG (2010) *GAD: an R package for ANOVA designs from general principles*.
- Schleuter D, Daufresne M, Massol F, Argillier C (2010) A user’s guide to functional diversity indices. *Ecol Monogr* 80:469–484
- Snelgrove PVR (1998) The biodiversity of macrofaunal organisms in marine sediments. *Biodivers Conserv* 7:1123–1132
- Strickland JDH, Parsons TR (1972) *A practical handbook of seawater analysis*. Fisheries Research Board of Canada,

Ottawa, Canada

- Törnroos A, Bonsdorff E, Bremner J, Blomqvist M, Josefson AB, Garcia C, Warzocha J (2014) Marine benthic ecological functioning over decreasing taxonomic richness. *J Sea Res*
- Villéger S, Mason NWH, Mouillot D (2008) New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology* 89:2290–301
- Violle C, Navas M-L, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E (2007) Let the concept of trait be functional! *Oikos* 116:882–892